引用格式：陈晓红，唐润成，胡东滨，等. 电力企业数字化减污降碳的路径与策略研究. 中国科学院院刊，2024, 39(2): 298-310, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230724003.
Chen X H, Tang R C, Hu D B, et al. Path and strategy of pollution and carbon reduction by digitization in electric power enterprises. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(2): 298-310, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230724003. (in Chinese)

电力企业数字化减污降碳的路径与策略研究

陈晓红[1,2]　唐润成[2]　胡东滨[2*]　徐雪松[1]　唐湘博[1]　易国栋[1]　张威威[1]

1 湖南工商大学 前沿交叉学院　长沙　410205
2 中南大学　商学院　长沙　410083

摘要　随着数字技术在能源领域的广泛应用和创新，数字技术对电力行业实现减污降碳目标的重要性日益凸显，数字技术如何赋能电力企业实现减污降碳目标备受关注。文章首先梳理分析了电力企业减污降碳中数字技术应用进展；然后揭示了现有数字技术应用于电力行业减污降碳存在的问题；最后探究了物联网和大数据、人工智能、区块链、数字孪生等新兴数字技术赋能电力企业减污降碳的方法路径及相应的实现策略。

关键词　数字化，减污，降碳，电力行业，路径，策略

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20230724003

CSTR　32128.14.CASbulletin.20230724003

随着“双碳”目标的提出，减污降碳已成为全球范围内关注的焦点。2022年，中国近90%的温室气体排放源自能源体系，其中电力行业作为二氧化碳排放的最大单一来源（48%）[1]，已经成为“双碳”目标下的重点改革对象。中国正处于“十四五”期间生态文明建设的关键阶段，该阶段的主要战略方向是以降低碳排放为重点，推动减少污染和碳排放的协同增效，同时促进经济社会发展全面绿色转型[2]。

传统电力行业“源—网—荷—储”各环节都面临巨大的减污降碳压力。① 传统发电企业依赖煤炭和天然气等高碳燃料导致大量温室气体排放和环境污染物释放。② 输电侧主要涉及电网的建设和运营，其中输电设备器材的制造和土建工程，尤其是特高压工程本身会产生相当多的碳排放。③ 用电侧在能源选择、能源效

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金基础科学中心项目（72088101），国家自然科学基金重大项目（71991465），湘江实验室重大项目（23XJ01005）
修改稿收到日期：2023年10月24日

率、负荷管理和设备选择等方面都直接或间接地影响着电力行业的减污降碳成效。④ 储电侧也面临着储能材料的能源密度低和成本高、废弃物污染与资源压力大、不可再生材料依赖性强、新兴技术商业化和规模化难，以及储能系统与电网匹配难度大等多重挑战。

随着数字技术在能源领域的广泛应用和创新，数字技术对电力企业实现减污降碳目标的作用日益凸显。电力企业可以通过数字技术的深度融合：实现碳污足迹的精准监测和计量；利用智能传感和大数据准确评估各个环节的碳污排放情况，进而有针对性地减污降碳；利用实时的数据监控和反馈机制，实现能源高效调度；推动能源消费理念的转变和重构能源商业模式；运用可靠的数据支持和智能化决策系统，帮助电力企业进行碳中和的精准规划和实施。鉴于我国能源体制中发电、输配变电、用电三方相对独立，目前尚未形成较为成熟的系统解决技术。但随着能源互联网建设和电力市场化改革的推进，输配电网建设将进一步挖掘虚拟电厂技术潜力[3]。通过降低分布式能源增长带来的调度难度，有望确保电力供应的安全、可靠、优质和高效，满足经济社会发展对电力多样化需求的总体目标和基本要求[4]。

综上所述，数字化赋能是电力企业减污降碳的重要手段和途径，但电力企业数字化减污降碳也面临诸如数字技术应用发展不均衡、数据安全防护存在较大风险、缺乏统一的技术标准及数字技术投入成本与收益不匹配等系列问题，这些制约着电力企业利用数字化技术推进减污降碳。为此，本文针对这一问题开展研究，通过系统分析数字技术在电力企业减污降碳中应用的现况和遇到的难题，提出物联网和大数据、人工智能、数字孪生与区块链等新兴数字技术赋能电力企业减污降碳的方法路径以及相应的实现策略，以期能够在国家“双碳”目标的引导下，为能源电力行业减污降碳和数字化转型发展提供科学理论参考。

1 数字技术在电力企业减污降碳中的运用进展

数字技术在推动电力企业减污降碳的进程中扮演着重要角色，为电力企业绿色发展提供网络化、数字化、智能化的技术手段，赋能电力企业转型升级和机构优化，优化企业资源配置、提升管理决策水平[5]。以下简述大数据、人工智能、区块链、云计算等数字技术在电力企业减污降碳领域的现有运用进展（图1）。

1.1 大数据应用

数字经济时代背景下，电力企业信息量呈现出爆发式增长的特点。如何利用大数据实现企业减污降碳

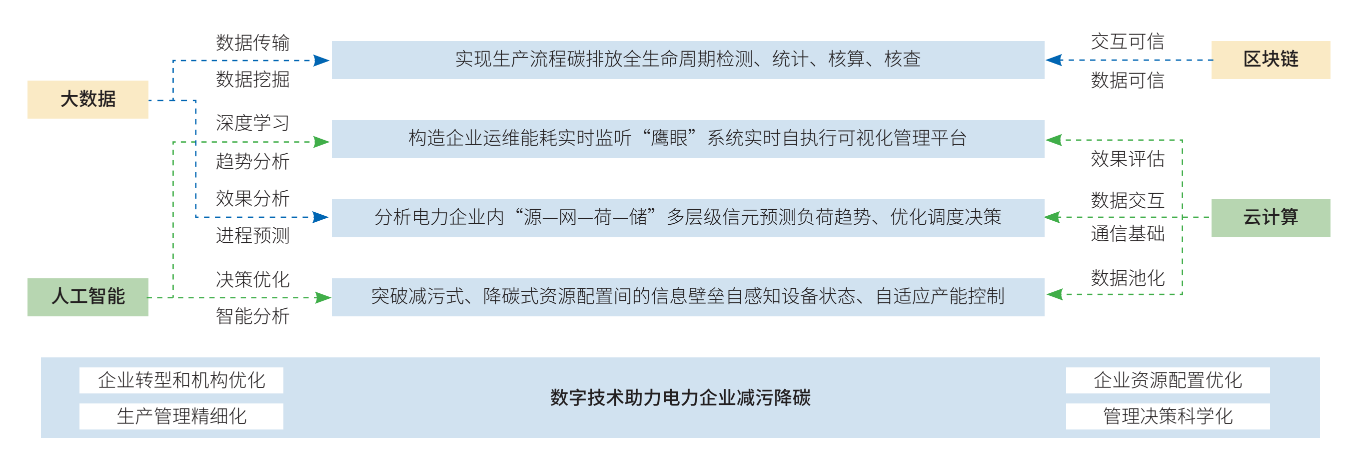


图1　数字技术在电力企业减污降碳中的运用进展

Figure 1　Application progress of digital technology to reduce pollution and carbon emissions in electric power enterprises

已成为产业界共同关注的话题。大数据在国内外电力企业减污降碳的应用中，主要集中于2个方面。

（1）大数据技术可通过收集和分析电力企业的能源数据，实现能源的有效管理和优化，提高发电效率，从而降低碳排放[6]。现阶段国内火力发电设备和技术潜力有限，中国火电机组全面改造进程缓慢。基于数据挖掘和人工智能算法等数字化管理技术，构建优化决策模型，指导火电机组进行灵活性深度改造，提高2%的发电效率，带来直接碳减排量达到2.5亿吨[7]。

（2）大数据技术可实时监测电力设备的运行状态和能耗情况，通过数据分析和算法模型，转换为可视化图表形式，并预估未来能耗为电力企业管理者提供节能建议和控制策略[8]。例如，国网湖南省电力有限公司联合百度智能云建设智慧能源新基建。国网湖南省电力有限公司充分利用百度地图大数据，以及电力用户数据、线路数据和设备数据等多维大数据的融合和可视化，形成“电网一张图”，提高电能利用效率，减少电力资源损失。

1.2 人工智能技术应用

人工智能技术是有效应对复杂系统控制和决策问题的关键手段[9]，在电力企业的数字化转型过程中广泛运用于生产、消费、传输、运营、管理、交易等环节。为破除传统生产落后工艺流程，革新以可再生能源为主的新一代综合能源接口，降低电力企业“三废”总量，提升绿色能源占比。人工智能技术助力电力企业减污降碳主要归纳为“预测—挖掘”“调度—优化”“管理—增效”3个方面。

（1）应用人工智能技术高效精准化预测。电力企业用能规模庞大、结构复杂，实行减污降碳措施急需对多维数据进行精准预测及高效管理。例如，能源设备图像识别、极端气候下能源网络损毁预测、企业用能行为的用户侧负荷预测、能源系统稳定性预测等，引导企业构建循环用能范式、提升用能系统整体的碳排放质量。从“源—网—荷—储”全周期减少对传统能源的依赖，实现减污降碳。

（2）应用人工智能技术柔性化调度。人工智能技术发展为电力企业用能多元化协同柔性调度，在精准化预测数据分析中实现减污降碳的智能化决策。例如，借助人工智能预测与优化技术，能够帮助企业在多种能源相互耦合供给的场景下，进行综合能效分析和能源系统多环节协调优化管控，从而以最高效的方式实现最清洁的能源消费[10]。建立基于大数据平台的“燃料智能掺配”系统，指导入炉燃烧煤种的选配；在机组深度调峰前，预先设定合理的燃烧煤种，保证锅炉运行的安全性和经济性。

（3）应用人工智能技术自主学习化管理。自主学习化管理是通过利用人工智能技术，实现企业内部综合能源系统的自适应控制和状态自感知。基于机器学习算法或强化学习算法，依据采集或预测数据构建多物理量、多尺度、多概率的数字孪生环境，并对模型参数化自适应更新[11]。例如，在国家能源集团、国家电力投资集团等旗下的火电厂通过孪生场景自主学习并借助孪生场景执行人工智能优化调度，形成“煤质数据在线监测—三维智能监控—智能运行优化”智慧决策体系，实现企业生产流程自主优化落实减污降碳决策。

1.3 区块链技术应用

当前，电力企业低碳转型过程逐步向多能异构常态化、产能消纳一体化、电力及碳排交易市场化的方向发展。区块链技术的应用为电力企业低碳转型减污降碳提供有力支撑。

（1）区块链技术赋能电力企业转型优化生产流程，促进碳排放，提升能源效率。将能源供应链结合区块链技术，电力企业可以实现对能源生产、储存、输配电和消费等环节的高效管理[12]。例如，区块链技术去中心化特点可实现智慧能源中多主体的对等互联，借助智能合约实现智慧能源中各相关主体对各类信息的广泛交互，助力电力企业系统运行质量和减污降碳

效益。

(2) 区块链技术赋能电力企业实现碳监测管理，为企业实现低碳发展提供量化决策依据及管理措施。例如，正泰物联网园区基于区块链的排放碳监测平台汇聚产线生产制造全流程碳排放数据；通过智能合约实时准确监测碳排放，自动完成各项数据申报，打通碳交易闭环，构建监管新模式，助力实现企业碳中和。

1.4 云计算应用

构建云计算平台是当前解决能源行业等传统领域算力、算法的关键支撑性技术。在电力企业减污降碳流程中，云计算平台利用技术突破来推动计算和其他信息技术资源的可持续发展，以实现可能的环境优势来匹配电力企业运行过程中各种减污降碳需求场景。

(1) 云计算助力电力企业数据资源池化，纵横向结合助力减排降碳。通过对电力企业生产、供应过程中边缘和端设备的大规模部署，以及大数据技术的应用，实现数据的收集和分析处理，从而实现更广泛的数据交流和协作。例如，国网江苏省电力有限公司通过服务器平台（Paas）实现对各类资源和应用的统一管理。同时，该平台可更有效地管理和分析供电消耗、发电效率等数据，从而支持减碳决策和优化供电管理。

(2) 云计算平台实现企业软硬件解耦，以满足电力企业对电网能耗监管。云计算能够提供强大的计算能力，用于电力系统的模拟和建模[13]。通过在云端进行电力系统的仿真和优化，可以帮助电力企业分析和优化电网的运行方式。例如，国网浙江省电力有限公司应用阿里云平台获取秒级故障原因和智能分析及处理信息，加快对故障定位并提高修复效率。

2 数字技术在电力企业减污降碳中的关键问题

大数据、人工智能、区块链等数字技术，为电力企业数字化转型及统筹协调减排和降碳提供了重大契机。然而，电力企业在利用数字技术进行减污降碳协同增效过程中尚面临着众多难题，极大制约了电力企业低碳化转型步伐。

2.1 数字技术在电力企业减污降碳中的应用存在薄弱环节

数字技术在电力企业减污降碳应用中的薄弱环节主要体现在2个维度：① 电力行业全产业链维度。从“源—网—荷—储”的全过程角度，目前发电企业、电网企业、储能企业和综合能源服务企业，利用数字技术在减污降碳过程取得了一些成效，但还可以更进一步发挥数字技术的重要作用。例如，在监测和管理发电设备方面，急需更高效的人工智能算法，对设备各操作环节的关键参数进行智能分析和优化，找出不同负荷下最优的设备操作参数，最大程度上优化能耗。在电网企业的电力输送过程中，通过5G通信、人工智能、数字孪生和智能微电网等技术实现“源—网—荷—储”的协调与平衡需要加强统筹和布局。② 电力企业减污降碳过程维度。“双碳”目标的实现对电力企业碳排放监测、碳排放的精准测算、减污降碳目标实现进程的预测、减污降碳方案的制定，以及减污降碳方案实施的智能管理与效果评估等提出了更高的要求。传统的碳排放监测技术短期内难以对大量排放源实现广泛监测，电力企业采用的排放因子法难以精准测算碳排放量。物联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等数字技术在碳排放、碳测算等方面发挥着重要的作用。但是，由于电力大数据、能耗大数据、产能大数据等来源分散且广泛，并且数据归属部门多，阻碍了数字技术的高效利用，无法及时掌握电力企业在生产过程和运行过程中碳排放的实时动态。而且，在电力企业管理模式和生产方式等的转型升级中，难以找到有效的场景推动以能源技术、污染治理技术、环境监测技术等为代表的绿色技术与数字技术的深度融合创新，也造成数字技术在电力企业减污降碳中缺乏高效的利用。

2.2 数据安全防护尚需要进一步加强

电力数据主要来自发电、输电、变电、配电、用电和调度等环节，这些数据具有类型繁多、体量巨大且增速快等特点。随着电力数据的开放共享和电力企业的数字化转型，电力企业面临着数据安全缺乏监管、数据流通安全防护薄弱等问题。电力企业的相关数据类型庞大，种类众多，如电力生产数据、企业排放数据、用户消费数据等，这些数据一旦泄露，电力企业的关键核心业务、用户隐私等都将面临在网络中暴露的潜在风险[14]。并且，这些数据关系着国民与资源的敏感数据，对电力网络安全也提出了较高的要求，构筑安全的电力数据防护体系也成为关键。

2.3 数字技术在电力企业减污降碳中缺乏统一的技术标准

电力数据覆盖“发、输、配、售”全环节及企业管理等方面，电力数据具有规模大、种类多、价值高的特点；电力数据的保护重点涵盖了数据采集、传输、存储、使用等全生命周期。但是，目前主要由各电力企业自行制定数据安全定级办法，还没有统一的分级分类、安全保护等的管理办法，进而造成电力数据的共享公开、安全防护等缺乏统一的标准。

同时，大数据、人工智能、物联网、数字孪生等数字技术已逐渐在电力企业的碳排放监测、智能电网管理等方面开展了初步的应用。由于数字技术在电力企业减污降碳方面的应用尚处于初级阶段，对数据采集、数据处理流程，以及电力数据挖掘、智慧分析和算法持续迭代能力欠缺，难以形成数据采集、分析、处理等的标准。

2.4 数字技术的投入成本和收益难以高效匹配

在实现“双碳”目标的过程中，电力企业被视为主要推动者和引领者，因其在构建以新能源为主体的新型电力系统中具有至关重要的地位。构筑新型电力系统旨在满足日益增长的清洁能源需求。然而，此目标的实现必须依赖于先进电子材料与设备技术的支撑。高端半导体材料的研制，将为能源电力系统的数字化转型提供强有力的硬件支持，以实现清洁能源的高效整合；高性能电力芯片的应用，将为能源电力系统设备状态的实时精准感知与高效控制提供关键保障；数字化与智能化电力设备的发展，将有效促进能源电力系统的安全高效运行[15]。此外，数字技术包括5G通信、大数据、云计算、物联网、人工智能、数字孪生等，正深刻地影响着电力系统中的各个环节。这些数字技术在电力企业持续健康发展的过程中，发挥着至关重要的技术支持作用[16]。而且，多灵活性、高可靠性、强韧性等的新型电力系统的构建对电力信息系统的信息安全也提出了更严格的要求。新型电力系统的稳健运行需要高效的访问控制、数据加密等技术提供全方位的安全保障体系。而这些数字技术在电力企业数字化转型中的投入，需要大量的资金支持，并且数字技术投入对电力企业数字化减污降碳可能不会带来立竿见影的效果。因此，电力企业在进行数字技术的投入时，需要综合考量数字技术投入成本和带来的收益，这也是数字技术在电力企业减污降碳应用中需要考虑的又一关键问题。

2.5 电碳协同发展不均衡

电力企业在减污降碳中既要推进建设新型电力系统，又要充分利用电力大数据的优势助力碳减排。但是，电力企业在电碳协同发展中目前仍存在一些问题，具体表现在：①碳减排策略与电力发展规划缺乏更深层次的融合。电力企业的低碳发电、电网的高效运行、电力企业的储能规划等环节，与碳减排需求缺乏更加高效的有机协同。②电、碳部分数据未能打通，尚未建立完善的电碳数据库。电力大数据可以每分钟高频进行采集，而碳排放数据的采集频次较低，两类数据之间可能会因为时间上的差异而难以深度融合。而且，由于对碳排放主要区域、重点行业等的排放数据的高频采集不够，目前尚未形成覆盖重点区域、高耗能企业等的电碳大数据库。③电碳协同优化

调度技术尚不成熟。发电机组设备的碳排放与优化是电力企业减污降碳的重要环节，不仅需要对发电机组设备碳排放进行实时监测，还需要综合考虑设备的运行状态和运行参数，尚且急需开发既能准确掌握机组动态碳排放强度，又能合理优化发电机组组合的调度侧电碳协同优化技术。由于碳市场价格的难以精准测算，以及碳排放强度的动态衡量不精准等，目前仍缺少综合考虑碳排放强度和碳市场价格的协同优化技术。

3 数字技术赋能电力企业减污降碳的方法路径

基于前述研究，本部分将聚焦电力企业在减污降碳过程中面临的痛点和难点，将着眼于发电企业的清洁能源投入、企业电力耗能的数据监测和电力系统全环节碳排放的精准计量、实施减污降碳的智能化管理路径及实施等工作，实现发电企业的源端降碳、用电企业的终端脱碳，以及相应政策的及时优化。探究利用物联网、大数据、人工智能、数字孪生、区块链等数字化前沿技术来助力电力企业实现减污降碳的总体目标（图2）。

3.1 数字技术赋能清洁能源发电实现供电企业源端降碳

据《新时代的中国能源发展》报告，自2005年以来，我国在推动非化石能源发展和减少供电能耗、线损率等方面采取了一系列节能减排措施，实现了能源生产和利用模式上的重大革新。在这一过程中，清洁能源占总能耗的比重达到了23.4%，2019年中国的碳排放强度相比2005年已经降低了48.1%，由此可见，能源的绿色发展在我国的碳排放强度下降方面扮演了至关重要的角色。尽管煤电装机比重和火电发电量持续下降，当前及未来一段时间内，煤电仍然是我国电力和电量的主体来源，导致电力体系依然呈现巨大的高碳结构。

在“十四五”规划期间，我国将致力于开发和采用更加高效、低碳的能源生产技术，以提高能源资源的利用效率；同时加大清洁能源的投入和使用，以期提高清洁能源在总能源消耗中的占比，推动能源产业向更加环保、可持续的方向转型。预计到2030年，我国清洁能源的消费比重将达到约25%[17]。因此，要实现“双碳”目标，需要从根本上减少化石能源消费，

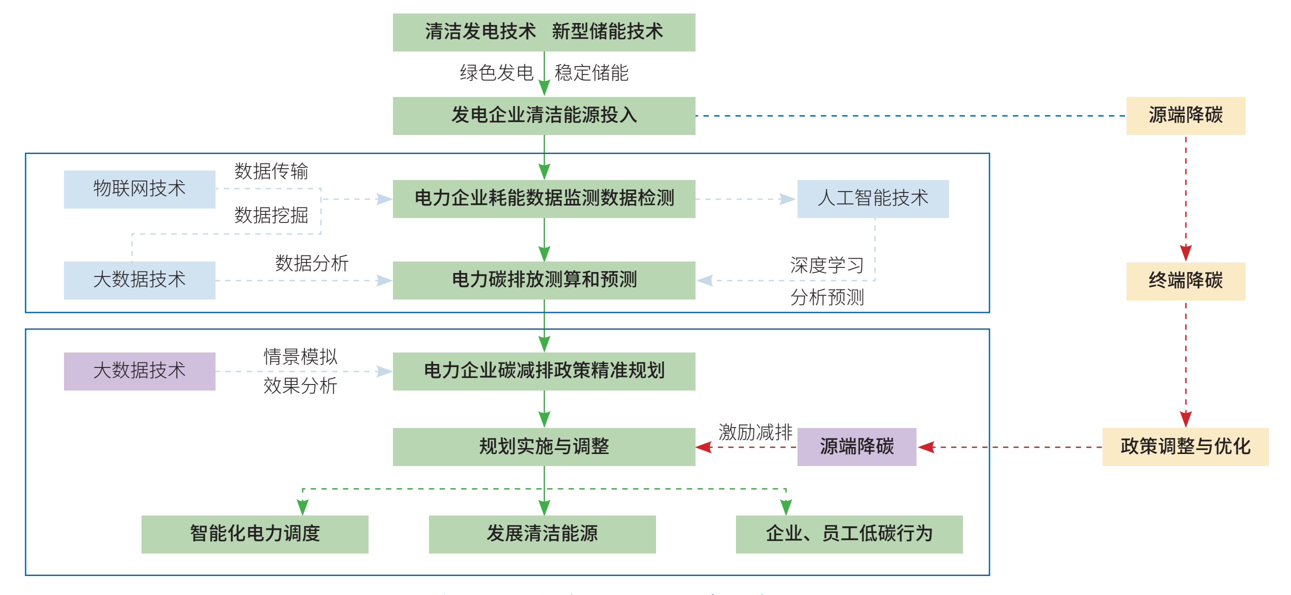


图2　数字化技术赋能电力企业减污降碳的总体路径

Figure 2　Overall path of digital technology enabling electric power enterprises to reduce pollution and carbon emissions

大幅增加非化石能源消费，同时，利用清洁能源发电技术降低源端发电产生的碳污染，改造供电企业的发电结构特征。

（1）大数据技术实现清洁能源的高效利用。对于供电企业，清洁能源发电技术在源端直接减少碳排放方面发挥着重要作用。在清洁能源使用方面，存在利用率不高、不稳定等问题。利用大数据技术实现发电功率的精准预测，突破低成本高效率的清洁能源发电。在风电方面，大数据技术可以通过收集和分析气象数据、风速、风向等参数，预测未来的风能资源情况；通过对历史数据和实时数据的分析，可以建立精确的风能预测模型，提前做出发电计划和调度安排，从而提高风电的发电效率。在光伏发电方面，大数据技术可以通过对光照强度、气温、云量等因素的实时监测和分析，预测光伏发电的潜力和发电效率。同时，大数据技术还可以对光伏电池组件进行监测和管理，提高光伏发电系统的运行效率和可靠性。通过利用大数据技术，可以优化光伏发电系统的设计和运营，使其在低成本和高效率方面取得突破。

（2）数字储能技术助力清洁能源的稳定存储。清洁能源的管理问题是电力行业发展的重中之重，其中清洁能源的稳定存储尤为关键，面临着3个方面的挑战。① 清洁能源（如太阳能和风能）具有间歇性和不可控性的特点，依赖于天气条件和自然资源的可用性，导致供需不平衡；② 目前较为广泛使用的储能技术是电池储能系统（如锂离子电池和钠离子电池），以及新型的储能技术（如氢能、空气压缩存储等）价格较为昂贵，企业投入成本过高；③ 能源传输损耗是另一个挑战，长距离传输清洁能源可能会导致能量损失，需要有效的输电和分配系统来解决这个问题。数字技术的出现和发展为解决电力行业清洁能源的存储问题提供了全新机遇，电力企业能够通过数字技术实现智能化储能管理，使储能设备可以智能感知和实时响应能源需求。通过实时监测清洁能源产量和电网负荷，智能化储能系统可以优化能量的储存和释放，以平衡能源供求。此外，通过大数据预测分析可用于提前规划储能行为，确保在清洁能源充足时进行储存，在用电高峰时进行释放，从而实现能源供应的稳定性。

3.2 物联网、大数据技术实现电力企业全环节精准碳计量

精准的碳排放计量体系是实现电力企业减污降碳的基石，具有关键性的政策引领作用。电力企业的碳排放来源主要可分为发电企业的直接碳排放，以及用电企业行为不同导致的间接碳排放，碳排放量的精准计量需要涉足多个环节，全环节碳计量更是一项复杂的工程[18]。因此，为实现全环节精准碳计量和企业的碳责任分摊，电力企业可以通过引入物联网、大数据技术来解决碳计量中精确度不高和实时性不强的问题。

（1）物联网技术实现电力企业耗能的实时监测。为充分探究企业电力耗能的特征，监测企业耗电行为，以改造企业用电策略从而减少耗能，电力企业可以利用物联网技术将传感器和智能设备连接到企业的各个设备上，实现对电力数据的准确监测。传感器可以收集电流、电压、功率等关键参数的数据，并将数据通过物联网网络传输到大数据中心或云计算平台。通过实时监测和采集数据，对企业用电习惯进行统计分析，了解电力使用的细节和模式，以支持电力管理和优化决策。

（2）大数据技术实现发电企业的多类型电源碳计量。基于联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）“三可原则”，需研究发电企业中多类型发电源的碳排放计量方法[19]。目前，发电企业的发电源主要分为传统的化石能源和可再生能源（如风能、太阳能等）。对于传统的化石能源，可采用燃烧排放因子法①，依

① 排放因子是单位活动碳排放系数。

据燃料消耗量和相应的排放因子即可计算出直接碳排放[20]；而对于可再生能源，需要考虑其消纳所需的备用，调频等辅助工作引起的碳排放，可通过大数据技术进行等效碳排放建模，实现可再生能源的碳计量[19]；部分电力企业可能存在氢能等新能源，也可通过建模的方式进行模拟计算，实现发电企业的多类型碳计量。

（3）*大数据技术实现对用电企业的实时精准碳计量*。对用电企业各部门耗能的碳排放水平计算时，需研究用电行为的精准碳计量方法[21]。利用大数据技术建立“电–碳”模型，分析和处理大量的电力消耗数据；结合“电–碳”模型的碳排放因子，可以实现对电力碳排放的精确计算。通过应用“电–碳”模型，对企业用电行为模式进行分析，识别高耗能设备、高峰用电时段等；之后，将电力碳排放的结果以大数据可视化的形式呈现出来，从而可以直观地了解碳排放的情况；进而，为企业提供基于数据的能源管理决策支持，帮助其实现碳减排的目标。实时精准碳计量，企业可以准确分摊不同部门的碳排放，推动内部能源管理和减排措施的实施。

3.3 人工智能实现电能的高效利用

人工智能技术是解决复杂系统控制与决策问题的有效措施，其在能源行业的深入应用，有助于推动清洁能源生产，降低碳排放[8]。因此，应用人工智能技术实现电能高效调度和利用，成为我国电力企业碳减排的重要实践举措。

（1）*人工智能实现负荷预测和调度优化*。人工智能技术可以通过分析电力企业历史负荷数据、天气、温度等信息建立深度学习模型，预测电力需求的变化趋势，并制定最佳的负荷调度策略。人工智能可以实时监测电力系统的运行状况，根据需求和供应情况进行智能调度，以最大程度地利用可再生能源和优化传统能源的使用，提高电能的利用效率。

（2）*人工智能实现企业电力系统的智能化管理*。人工智能技术可以结合物联网技术，实现对电力设备和能源系统的智能管理。通过连接传感器和智能设备，电力企业可以利用人工智能技术实时监测能源消耗、设备状态和环境参数，通过机器学习和数据分析技术，优化能源系统的运行和控制策略，实现能源的高效利用和节能减排。

3.4 区块链技术实现电力企业低碳行为的激励

（1）*区块链技术保护企业数据的隐私性*。在对电力企业的数字赋能中，数据的隐私性是一个重要的考虑因素。电力企业在监测和记录能源消耗、碳排放等关键数据时，需要确保这些数据不被篡改或泄漏。区块链技术作为一种去中心化和不可篡改的分布式账本技术，可以提供数据的安全存储和传输。通过将电力企业的数据以加密形式存储在区块链上，可以确保数据的保密性和完整性。此外，区块链技术还可以为企业提供数据访问权限控制机制，只有被授权的参与方才能查看和验证数据，保护企业的商业隐私和敏感信息。

（2）*激励电力企业的可持续低碳行为*。区块链技术不仅可以保护企业数据的隐私性，还可以通过智能合约机制激励电力企业采取可持续的低碳行为。智能合约是在区块链上执行的自动化合约，其中设定了特定的条件和激励机制。通过设定合约规则，电力企业可以获得奖励或优惠政策，以鼓励他们采取低碳发电、减少碳排放、提高能源效率等行为。区块链技术确保智能合约的执行结果被记录在区块链上，实现公开透明和不可篡改的激励机制，提高电力企业参与低碳行动的积极性。

3.5 数字孪生技术助力电力企业碳减排和精准规划

数字孪生技术是指通过数字模型和现实世界的实时数据进行交互，实现对物理实体的仿真和监控。在电力企业中，数字孪生技术可以为碳减排和精准规划提供有力支持（图3）。

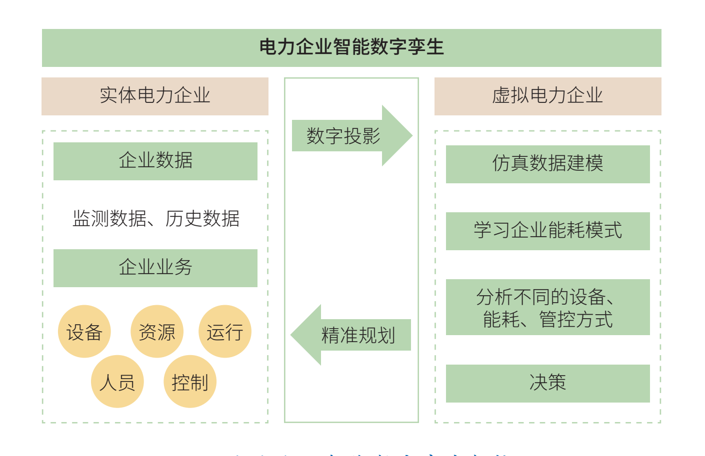


图3　电力企业智能数字孪生架构图

Figure 3　Smart digital twin architecture diagram for electric power enterprises

4 数字技术赋能电力企业减污降碳的策略

针对上述数字技术赋能电力企业源端降碳、能耗监测、高效用能、低碳行为激励、减排精准规划等减污降碳路径，本文提出电力企业数字化减污降碳的实施策略，保障数字技术赋能电力企业减污降碳路径的实效，进而促进电力企业的数智化绿色低碳转型。

4.1 着力推进电力数据安全治理和风险防控

数字技术在为电力企业的低碳化、智能化发展开辟了新途径的同时，电力数据作为企业的核心，面临着更加严格的安全考验。在深入分析电力企业现状的基础上，结合大数据时代的要求与行业发展的需要，提出以下思路。

（1）建立关键数据安全基础设施，健全安全管理机制。能源电力企业作为关键基础设施行业，对数据安全的管理非常重要。建立权责明晰、分工合理、协同高效的数据安全管理组织体系可以帮助企业更好地保护数据，并有效应对潜在的安全威胁。确保数据安全的关键步骤包括规范数据分类分级、推进安全管理制度建设、加强评估和责任追究，以及确立安全职责和权利。同时，对于需要外发数据的情况，建立备案制度，确保外发数据的安全性。建立灵活高效的数据安全应急响应机制，及时应对各类安全事件和威胁。定期对数据处理、使用、外发等环节进行安全评估，发现潜在风险，进而采取相应措施进行改进，并加强责任追究，以提升数据安全管理水平，降低数据泄露和风险的可能性。同时，还需持续关注数据安全领域的最新技术和法规要求，不断完善和提升数据安全管理水平。

（2）牢固树立法律红线意识和底线思维，推进安全合规机制建设。紧跟国家法律法规要求，加强数据安全法律意识宣传、深入分析数据安全案例，并依法依规落实个人信息安全保护要求；确保企业在数据处理和管理过程中遵守法律法规，防范数据安全风险，提高组织和个人对数据安全法律要求的认知，推进数据安全管理的合规化和标准化，有效防范数据泄露和滥用风险，保护客户的个人隐私和数据安全，在数据业务发展中树立法律法规红线意识；依法依规落实个人信息安全保护要求，合法合规获取、使用个人信息，对于违反安全合规规定的行为，及时采取纠正和惩处措施，形成严明的制度和规范，制定并推广适用于企业的数据安全和合规政策；明确各个环节的安全要求，包括数据收集、存储、处理、传输和共享等方面，避免侵犯客户个人隐私或违规获取客户个人信息。

（3）提升数据安全技术服务的专业能力，统一服务流程和操作规范。制定适用于数据安全技术服务的标准和规范，明确各项要求和指导原则，定期进行数据安全技术服务的审查和评估，发现问题并及时改进，保持服务质量和安全水平；加快应用数据脱敏、水印溯源、大数据态势感知等技术，并探索匿名化、数据标签、多方安全计算等应用场景。加强安全服务能力的开放调用、策略统一管理、风险统一研判。通过提升数据安全监测和攻防验证能力，有效减少数据泄露和安全风险。

（4）致力于培育数据安全人才队伍，以巩固安全防线。加强数据安全人才培养，构筑稳固的数据安全

防护架构。对电网企业而言，急需加速引进熟稔数据安全领域的专家，并专注培育具备法规合规及产业攻防专业技能的人才。同时，建构数据安全专业团队，强化从业人员的职责履行能力和职业操守。促进数据安全管理机构与业务部门之间的交互融合，协同开展数据安全相关工作，以确保数据安全责任的落地与实践，并培养具有扎实业务素养及高度安全意识的专业人才。此外，强化企业各部门在数据安全领域的交流与合作，建立常态化沟通协作机制，以塑造优良的数据安全专业人才培育、技术创新与产业发展新生态[22]。

4.2 发挥数字化优势提升碳市场运营水平

电力市场与碳市场之间存在着极强的关联性，发电企业的生产消费产生碳排放，而碳价也影响着发电企业成本，电力行业同时也是首批纳入碳市场的对象。要充分发挥电力企业数字化转型的优势，建立以电—碳关系为基础的碳排放监测、计量标准和核算体系，有效提升碳核查数据质量。① 发挥电力数据覆盖面广、实时性强、可靠性强、数字化程度高等优势，强化基于电力流的碳排放监测技术和电力大数据辅助核查技术，提升企业报送碳排放数据过程的精准管控。② 电力企业在保障信息安全的前提下打造“电碳数据库”，利用电力市场数据和数字技术手段增强市场主体的碳足迹追踪、碳配额核准能力。③ 充分利用数字化技术，加强绿色电力证书和碳交易市场的数据共享，推动碳市场与绿色电力市场有机衔接。电力企业可利用国际互认的绿电交易凭证，将富余的碳排放配额在碳市场中出售并获得额外的经济收益，这有助于增加碳市场的参与主体数量并扩大交易规模。

4.3 利用数字化技术应对欧盟碳税的不利影响

① 推动碳排放数据的监测、报送与核查（MRV）与区块链技术相结合，以此保障数据监测的真实性，同时也为企业应对欧盟碳边境调节机制（CBAM）中可能出现的碳排放数据争议提供可靠支持。② 推动受CBAM影响的企业同时参与碳市场和绿证交易市场，并允许其所购绿证转化为国家核证自愿减排量（CCER）抵消碳配额，以降低其间接电力消耗的碳排放，同时发挥两个市场的协同减排作用。③ 推动电力企业全链条碳减排与碳足迹报告实施追溯。依靠数字化碳管理平台开展供应链碳足迹核算工作及减排实施方案规划，从数据源头开始，利用物联网服务实时采集数据，并基于区块链技术解决数据可追溯、不可篡改的问题，实现多场景/技术路线的可一键编制全生命周期碳足迹报告，支持企业提前应对CBAM、产品碳足迹披露要求等绿色贸易壁垒。

4.4 建立支撑智慧电力系统的数字标准体系

在建立完善智能电力系统时，首先应先制定完善的指标体系，为人工智能的日常检查提供依据，以此来获得更为准确合理的数据结果，当前，该标准体系包含3类技术标准。

（1）发电侧。需要统筹煤炭等化石能源和水、风、光等清洁能源与多能互补技术标准，对其数据交换方式、信息传递需求等进行深入研究和分析，了解各种数字标准的应用场景和影响因素；加强传统调峰电源技术标准建设，包括煤电灵活性改造、抽水蓄能及燃气发电等标准，以充分发挥其灵活调节和协调运行能力，为电力系统持续运行提供必要的支撑。

（2）电网侧。需要完善输电网络与变电技术的相关标准体系，同时，加快配电网络的优化升级，推动分布式电源和微电网相关标准的建设，确保分布式新能源的高效就地消纳，并以此促进微电网的深层次发展。新能源的规模性发展仍存在不足之处，如电力系统面临灵活性资源紧缺、新能源消纳能力薄弱、系统可靠性下降、配网侧运行与维护管理难度增加等一系列挑战。因此，新型电力系统技术标准体系仍需多方面发展和针对性完善。

（3）储能侧。需要不断加强多种储能技术与电力系统备用技术标准体系的建设。参考相关行业标准，

如储能设备的通信接口标准、数据格式标准等，了解行业内已有的数字标准，并结合自身需求进行适应性调整。根据储能侧的数据交换需求，定义相应的数据模型和接口规范，确保数据的一致性和可交互性，为特殊情况下电力系统的安全稳定运行提供保障。

4.5 助力电力企业提质降本增效

电力企业降本增效的重要内容在于能源和信息交换，在充分理解电力行业数字化转型需求的基础上，结合自身数字化转型及服务电力行业数字化的实践经验，为不同发展阶段和规模的企业提供数字化转型“贴身伴跑”服务。同时，从算力、网络、平台、安全等多方面发力，全面推动“广泛联接+智能高效+安全可靠+绿色低碳”的新型能源体系建设。将电力资产日常管理与数字化管理系统有效地整合；现场操作人员扫描射频识别标签（RFID），自动获取设备在规划设计、采购建设、验收投运、运维检修、报废等阶段的海量信息数据，从而达到实物信息与系统信息的实时同步一致，可实现对输、变、配电网生产设备、计量资产、办公资产、信息通信资产、工器具等电网资产的实物管理，提高资产管理业务操作效率和资产全生命周期信息追溯与周期管理水平。

参考文献

1 国际能源署. 中国能源体系碳中和路线图. 北京: 国际能源署, 2022.
International Energy Agency. Roadmap for carbon neutrality in China’s energy system. Beijing: IEA, 2022.

2 陈军, 肖雨彤. 生态文明先行示范区建设如何助力实现“双碳”目标? ——基于合成控制法的实证研究. 中国地质大学学报(社会科学版), 2023, 23(1): 87-101.
Chen J, Xiao Y T. How does the construction of the Ecological Civilization Pilot Demonstration Zone help achieve the “dual carbon” goal?—An empirical study based on synthetic control method. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2023, 23(1): 87-101. (in Chinese)

3 艾瑞咨询集团. 中国电力产业数字化研究报告. 北京: 艾瑞咨询集团, 2022.
iResearch Consulting Group. Research Report on the Digitalization of China’s Power Industry. Beijing: iResearch, 2022.

4 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
Wei Z N, Yu S, Sun G Q, et al. Concept and development of virtual power plant. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9. (in Chinese)

5 沈于. 运用数字技术减排降碳. 群众, 2022, (8): 37-38.
Shen Y. The use of digital technology to reduce emissions and carbon emissions. People, 2022, (8): 37-38. (in Chinese)

6 许才, 张平, 刘春晖, 等. 基于大数据技术的多能互补能源体系优化管理// 中国电力企业管理创新实践(2019年). 北京: 中国会议, 2020.
Xu C, Zhang P, Liu C H, et al. Optimal management of multi-energy complementary energy system based on big data technology// Innovation Practice of Management of China’s Electric Power Enterprises (2019). Beijing: China Conference, 2020.

7 赛迪顾问股份有限公司. 碳中和背景下数字技术赋能的中国新型电力系统白皮书. 北京: 赛迪顾问股份有限公司, 2022.
CCID Consulting Company Limited. White Book of China’s New Power System Empowered by Digital Technology in the Context of Carbon Neutrality. Beijing: CCID Consulting Company Limited, 2022.

8 祁文坤. 大数据及可视化平台在电力企业中的应用. 电子世界, 2016, (24): 138.
Qi W K. Application of big data and visualization platform in electric power enterprises. Electronic World, 2016, (24): 138. (in Chinese)

9 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1019-1029.
Chen X H, Hu D B,Cao W Z, et al. Path of digital technology promoting realization of carbon neutrality goal in China’s energy industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1019-1029. (in Chinese)

10 李硕, 张建国, 白泉, 等. AI赋能园区降碳潜力分析研究. 中国能源, 2022, 44(6): 11-18.

Li S, Zhang J G, Bai Q, et al. Analysis and research on carbon reduction potential of AI-enabled park. Energy of China, 2022, 44(6): 11-18. (in Chinese)

11 孟明, 商聪, 马思源, 等. 基于区块链的综合能源系统低碳优化调度研究. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 67-80.

Meng M, Shang C, Ma S Y, et al. Research on low-carbon scheduling of integrated energy system based on blockchain technology. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50(3): 67-80. (in Chinese)

12 殷爽睿, 艾芊, 宋平, 等. 虚拟电厂分层互动模式与可信交易框架研究与展望. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 118-128.

Yin S R, Ai Q, Song P, et al. Research and prospect of hierarchical interaction mode and trusted transaction framework for virtual power plant. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 118-128. (in Chinese)

13 唐智星, 何文武. 智能电网建设中云计算大数据处理技术的应用. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(4): 41-42.

Tang Z X, He W W. Use of cloud computing big data processing technology in smart grid construction. Modern Industrial Economy and Informatization, 2023, 13(4): 41-42. (in Chinese)

14 王于鹤, 王娟, 邓良辰. "双碳"目标下能源行业数字化转型的思考与建议. 中国能源, 2021, 43(10): 47-52.

Wang Y H, Wang J, Deng L C. Thoughts and suggestions on the digital transformation of energy industry under the goals of carbon peak and carbon neutralization. Energy of China, 2021, 43(10): 47-52. (in Chinese)

15 李元丽. "双碳"目标驱动能源电力系统数字转型. 人民政协报, 2023-02-14(06).

Li Y L. The goal of "dual carbon" drives the digital transformation of energy and power systems. CPPCC Daily, 2023-02-14(06). (in Chinese)

16 苗长胜. 我国电力企业数字化转型的探索与实践探析. 四川文理学院学报, 2022, 32(1): 69-74.

Miao C S. Exploration and practice of digital transformation of electric power enterprises in China. Sichuan University of Arts and Science Journal, 2022, 32(1): 69-74. (in Chinese)

17 国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展. 北京: 国务院发展研究中心, 2020.

State Council Information Office. China's Energy Development in the New Era. Beijing: Development Research Center of the State Council, 2020. (in Chinese)

18 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12.

Zhang N, Li Y W, Huang J H, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12. (in Chinese)

19 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的"碳视角": 科学问题与研究框架. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.

Kang C Q, Du E S, Li Y W, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833. (in Chinese)

20 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述. 中国电机工程学报, 2023, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452.

Liu Y L, Li Y W, Zhou C L, et al. A review of carbon emission measurement and analysis methods in power systems. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2023, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452. (in Chinese)

21 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.

Kang C Q, Du E S, Guo H Y, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.

22 段凯, 李竹, 刘锋, 等. 浅析电力营销数据开放与共享安全治理. 中国新通信, 2023, 25(2): 125-127.

Duan K, Li Z, Liu F, et al. Analysis on security governance of power marketing data opening and sharing security governance. China New Telecommunications, 2023, 25(2): 125-127. (in Chinese)

Path and strategy of pollution and carbon reduction by digitization in electric power enterprises

CHEN Xiaohong[1,2] TANG Runcheng[2] HU Dongbin[2*] XU Xuesong[1] TANG Xiangbo[1]
YI Guodong[1] ZHANG Weiwei[1]
（1 School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China;
2 Business School, Central South University, Changsha 410083, China）

Abstract With the extensive application and innovation of digital technology in the energy sector, digital technology has become increasingly crucial for the power industry to achieve the goal of reducing pollution and carbon emissions. How digital technology enables electric power enterprises to achieve this goal has attracted much attention. Firstly, the study analyzes the progress of digital technology applications in pollution reduction and carbon reduction in electric power enterprises. Then, it identifies the existing problems in the current application of digital technology in the power industry for reducing pollution and carbon emissions. Finally, it explores the potential ways and approaches of emerging digital technologies such as the Internet of Things, big data, artificial intelligence, blockchain, and digital twins in enabling electric power enterprises to reduce pollution and carbon emissions, along with corresponding implementation strategies.

Keywords digitization, pollution reduction, carbon reduction, power industry, pathways, strategies

陈晓红 中国工程院院士。湖南工商大学、中南大学教授、博士生导师。湘江实验室主任、“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”国家基础科学中心主任。主要研究领域：决策理论与决策支持系统、大数据分析与智慧管理、中小企业融资、两型社会与生态文明等。E-mail: c88877803@163.com

CHEN Xiaohong Academician of the Chinese Academy of Engineering. Professor and Ph.D. Supervisor at Hunan University of Technology and Business and Central South University. Director of Xiangjiang Laboratory, Director of the National Basic Science Center of Resources and Environmental Management Theory and Application in the Digital Economy Era. Her main research areas include decision theory and decision support systems, big data analysis and smart management, SME financing, resource conserving & environment friendly society and ecological civilization, etc. E-mail: c88877803@163.com

胡东滨 中南大学商学院教授、博士生导师。主要研究领域：决策理论与决策支持系统、大数据与人工智能、资源环境管理。E-mail: alanhdbin@csu.edu.cn

HU Dongbin Professor and Ph.D. Supervisor of Central South University. His main research covers decision theory and decision support systems, big data and artificial intelligence, resource and environmental management, etc. E-mail: alanhdbin@csu.edu.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author